第46卷 第6期
2023年6月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 6
Jun. 2023

干旱区人居环境系统耦合协调的时空演变及作用机制研究
——以新疆为例

姚岚博[1,2]， 冶建明[1,3]， 王 芸[1]， 朱现伟[1]

（1. 石河子大学农学院，新疆 石河子 832003；2. 武汉大学城市设计学院，湖北 武汉 430062；
3. 同济大学建筑与城市规划学院，上海 200092）

摘 要： 干旱区人居环境受到干旱自然条件的制约呈现出系统失衡的态势，如何促进系统耦合协调对干旱区人居环境建设至关重要。为探索系统耦合协调视野下干旱区人居环境的时空演化机制，以新疆14地州市人居环境为研究对象，构建干旱区人居环境系统协调发展评价体系，基于5个子系统的耦合协调度模型，综合运用熵值法、GIS空间分析与结构方程模型，探索2003—2019年新疆人居环境系统耦合协调度的时空演变规律与耦合作用机制。研究表明：（1）在时间维度上，2003—2019年新疆人居环境系统的耦合度与耦合协调度均呈现波动上升趋势，14地州市之间增速不均匀。（2）在空间维度上，形成"中间高、两侧低、北高南低"的空间分布格局，在东西方向由"一字型"向"倒U型"演变，在南北方向由"一字型"向"U型"再到"斜线型"演变。（3）在作用机制方面，主要形成"人类系统→社会系统→居住系统→支撑系统"，以及"社会系统→自然系统"的作用路径，其作用效应依次为0.570、0.972、0.953、−1.189。其中，人类系统是干旱区人居环境协调发展的根本动力，通过社会系统正向或负向地间接作用于其他系统。

关 键 词： 干旱区人居环境；系统耦合；空间分析；结构方程模型；新疆

文章编号： 1000－6060(2023)06－1013－11(1013～1023)

习近平总书记在党的十九大报告中明确提出"坚持人与自然和谐共生"的中国特色社会主义的基本方略。作为连接人与自然及其相互作用关系的中介与纽带，人居环境的理想状态是实现人与自然的和谐统一[1]。但对干旱区人居环境建设而言，往往面临干旱自然环境与生态宜居建设之间的矛盾。由于气候条件干旱、水资源分布不均衡、生态基础薄弱等自然背景的限制，导致干旱区人居环境的经济发展水平相对滞后，基础设施建设不够完善[2]，制约着干旱区人居环境的系统内部协调与可持续发展。因此，如何协调干旱环境与生态宜居之间的关系，如何促进干旱区人居环境各个系统的协同发展，已成为干旱区人居环境研究亟待解决的关键问题。

从系统耦合协调的视野去探索人类聚居发生与演变的客观规律对人居环境协调发展具有重要意义。目前，国内外关于人居环境的研究主要集中在质量评价[3]、适宜性[4]、时空格局[5]、演变机制[6]、规划设计[7]和环境治理[8]等方面，呈现出多领域交叉的融贯性特征。人居环境学强调把人类聚居（城市或乡村等）作为一个整体[9]，但从系统耦合协调角度进行的整体性研究较为薄弱，在此方面多以新型城镇化、生态环境、区域经济与旅游产业等为主体[10-11]进行耦合分析，鲜有研究人居环境系统内部的耦合协调，对多个系统耦合机制的研究关注不多，未能

收稿日期： 2022-06-02； **修订日期：** 2022-10-09
基金项目： 教育部人文社科基金（22YJAZH132）；国家自然科学基金重点项目（52130804）；兵团社科基金（18YB08）资助
作者简介： 姚岚博（2001-），男，硕士研究生，主要从事人居环境等方面的研究. E-mail: 764112015@qq.com
通讯作者： 冶建明（1981-），男，副教授，主要从事人居环境等方面的研究. E-mail: 26043741@qq.com

深入剖析人居环境时空耦合下的内在作用关系。

因此，本研究将科学问题凝练为“系统耦合协调视野下干旱区人居环境的时空演化机制”。新疆属于中国西北典型的干旱区人居环境，气候干旱、生态脆弱、沙漠化环境，水、土、建材等资源匮乏，特殊的自然条件让新疆面临着严峻的人居环境建设考验[12]。为此，本研究以新疆14地州市人居环境为研究对象，建立干旱区人居环境系统综合评价体系，基于耦合协调度模型的计算结果，运用GIS空间分析法阐明新疆人居环境系统耦合协调度的时空演变格局，运用结构方程模型揭示新疆人居环境系统耦合协调的相互作用机制，以期为干旱区人居环境建设与可持续发展提供理论支持与科学依据。

1 研究区概况

本研究以新疆（73°40′~96°18′E，34°25′~48°10′N）为研究区域，以其14个地区、自治州与地级市（简称地州市）为研究单元（图1）。新疆处于中国的干旱与极端干旱区，平均降水量不足全国的1/4，仅为147 mm。此外，新疆的日照强度较高，水资源蒸发量远大于降水量。总而言之，新疆降水量少、分布不均匀，是干旱区的典型代表，具有独特的研究价值。本研究单元是新疆地级行政区域，考虑到地级市与县级市多方面的数据规模差距，故未涉及自治区直辖的县级行政区域。

2 数据与方法

2.1 指标体系与数据来源

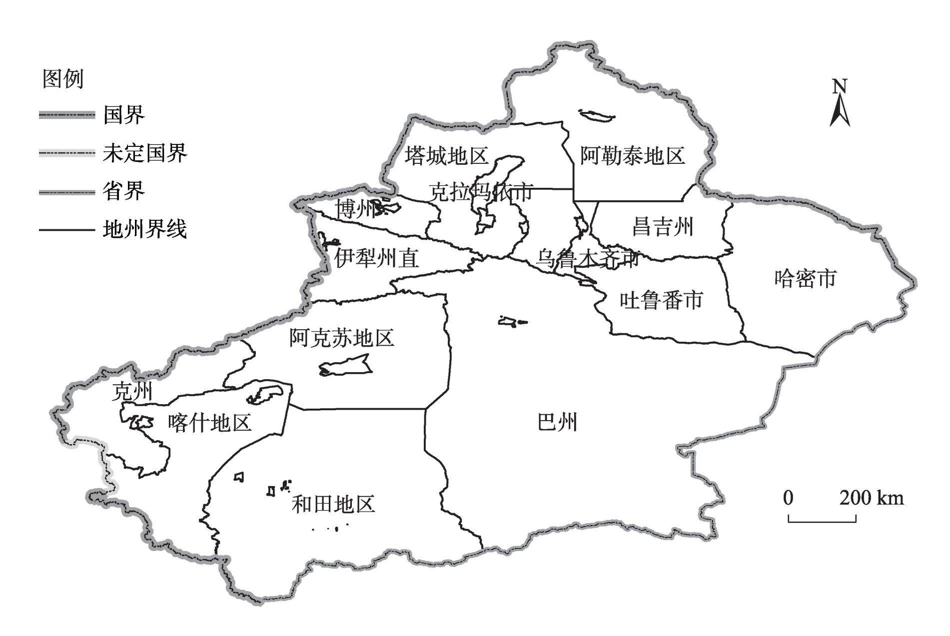
本研究以吴良镛院士的人居环境学[1]为理论根基，构建“自然-人类-社会-居住-支撑”5个子系统的人居环境综合评价指标体系[13-16]。干旱区人居环境建设要满足人类生存与发展对“水”的需求[12]，因此补充水资源总量、水土流失治理面积等[17]体现干旱区特色的指标（表1）。各指标原始数据来自2003—2019年《新疆统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》等，对于缺失数据按年均增长率进行赋值，采用熵值法确定各个观测指标相应的权重。

2.2 研究方法

2.2.1 熵值法综合评价 采用极差标准化法进行数据预处理，由公式（1）~（4）根据指标数据的客观离散程度确定其权重，采用公式（5）加权求和计算得出新疆人居环境各子系统综合评价指数。

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}}, \quad k = \frac{1}{\ln m} \tag{1}$$

$$e_j = -k \sum_{i=1}^{m} p_{ij} \ln p_{ij} \tag{2}$$



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作，底图边界无修改。图中的昌吉州为昌吉回族自治州；伊犁州直为伊犁哈萨克自治州直属县市；博州为博尔塔拉蒙古自治州；克州为克孜勒苏柯尔克孜自治州；巴州为巴音郭楞蒙古自治州。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

表1 新疆人居环境系统评价指标体系及权重

Tab. 1 Evaluation index system and the weight of human settlements system in Xinjiang

系统	潜在变量	观测指标	单位	性质	权重
新疆人居环境系统	自然系统	年平均气温	℃	正向	0.1091
		年平均降水量	mm	正向	0.1263
		年日照时数	h	正向	0.1027
		水资源总量	10^8 m^3	正向	0.1469
		水土流失治理面积	10^3 hm^2	正向	0.2899
		空气质量达到及好于二级天数的占比	%	正向	0.1281
		工业能源消费总量	10^4 t标准煤	负向	0.0969
	人类系统	年末人口数	10^4人	正向	0.1612
		城市人口密度	人·km^{-2}	正向	0.2977
		人口自然增长率	%	正向	0.1592
		非农业人口占总人口的比例	%	正向	0.1814
		城镇登记失业率	%	负向	0.2006
	社会系统	人均GDP	元	正向	0.1131
		第二产业产值占地区生产总值比重	%	正向	0.0857
		第三产业产值占地区生产总值比重	%	正向	0.1201
		全社会固定资产投资	10^4元	正向	0.1734
		各级各类学校数	个	正向	0.1584
		每万人口医疗卫生机构床位数	张	正向	0.1009
		文化、体育与娱乐业固定资产投资	10^4元	正向	0.2483
	居住系统	建成区面积	km^2	正向	0.2392
		城镇人均住房建筑面积	m^2	正向	0.2402
		房地产开发投资完成额	10^4元	正向	0.2571
		建成区绿化覆盖率	%	正向	0.1002
		人均公园绿地面积	m^2	正向	0.1633
	支撑系统	城市用水普及率	%	正向	0.0598
		城市燃气普及率	%	正向	0.0581
		供热面积	10^4 m^2	正向	0.2026
		人均日生活用水量	L	正向	0.2097
		污水处理率	%	正向	0.1561
		生活垃圾处理率	%	正向	0.1005
		人均道路面积	m^2	正向	0.2133

$$d_j = 1 - e_j \tag{3}$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j} \tag{4}$$

$$U_i = \sum_{j=1}^{n} w_j x'_{ij} \tag{5}$$

式中：p_{ij}为研究单元i指标j的归一化值；x_{ij}为研究单元i指标j的年鉴数据，x'_{ij}则对应其指标值；m为研究单元总数；k为系数；e_j为指标j的熵值；d_j为指标j的熵值冗余度；w_j为指标j的权重；n为指标总数；U_i为系统综合评价指数。

2.2.2 耦合协调度模型 采用耦合协调度模型去量化人居环境5个子系统之间的相互作用程度与协调发展水平，具体公式如下：

$$C = 5\left\{\left[U_{(a)} \times U_{(b)} \times U_{(c)} \times U_{(d)} \times U_{(e)}\right] / \left[U_{(a)} + U_{(b)} + U_{(c)} + U_{(d)} + U_{(e)}\right]^5\right\}^{1/5} \tag{6}$$

$$T = \alpha U_{(a)} + \beta U_{(b)} + \delta U_{(c)} + \lambda U_{(d)} + \mu U_{(e)} \tag{7}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{8}$$

式中：C为耦合度；T为综合协调指数；D为耦合协调度；$U_{(a)}$、$U_{(b)}$、$U_{(c)}$、$U_{(d)}$、$U_{(e)}$分别为自然、人类、社会、居住与支撑系统的综合评价指数。C值越高，说明各系统间相互影响的程度越强；D值越高，说明各系统间互相耦合的协调性越强。其中的α、β、δ、λ、μ为待定系数，参照前人研究[13,18]，本研究认为5个子系统在人居环境时空演化中具有同等重要的作用，故均取0.2，最后确定耦合协调度的分类标准（表2）。

表2 耦合协调度类型划分标准

Tab. 2 Classification criteria of coupling coordinative degree

耦合协调度	耦合协调度等级	耦合协调度	耦合协调度等级
0.00~0.09	极度失调	0.50~0.59	勉强耦合协调
0.10~0.19	严重失调	0.60~0.69	初级耦合协调
0.20~0.29	中度失调	0.70~0.79	中级耦合协调
0.30~0.39	轻度失调	0.80~0.89	良好耦合协调
0.40~0.49	濒临失调	0.90~1.00	优质耦合协调

2.2.3 ArcGIS空间分析 选取2003、2008、2013年和2019年4个时间截面的耦合协调度作为地理数据，首先采用ArcGIS软件的自然断点法表征其空间分布图，再运用ArcGIS软件的空间自相关分析探索其空间分布状态，最后运用ArcGIS软件的趋势分析，通过将空间数据拟合成数学曲面来阐述其在较大空间尺度中的变化趋势[13]，揭示新疆人居环境系统耦合协调度的空间分异规律及其演变趋势。

2.2.4 结构方程模型 结构方程模型(Structure equation model，SEM)本质上是一种运用协方差结构进行验证性分析的多变量统计方法，可以分析测量模型的一致性程度与结构模型的因果关系。本研究将人居环境5个子系统看作模型潜在变量，根据模型估计结果对相关变量的因果关系不断调整以找到最优模型，根据模型路径系数明确潜在变量之间的作用路径和作用效应[19]，即人居环境系统时空耦合机制。

3 结果与分析

3.1 耦合度与耦合协调度时序变化

本研究根据2003—2019年新疆14地州市人居环境系统耦合度、耦合协调度的变化，分别从新疆整体、5个子系统与14地州市之间对比分析其时间演变规律。

3.1.1 总体发展阶段差异 整体来说，2003—2019年新疆人居环境系统耦合度与耦合协调度均呈现波动上升趋势(图2)。耦合度在2007年下降到最低值，但总体增长趋势保持在0.8527到0.9832的高值区间。耦合协调度从2003年的0.5031上升到2019年的0.8142，年平均增长率为3.05%，从勉强耦合协调类型演变为良好耦合协调类型。这综合表明新疆人居环境5个子系统的相互作用程度与系统整体

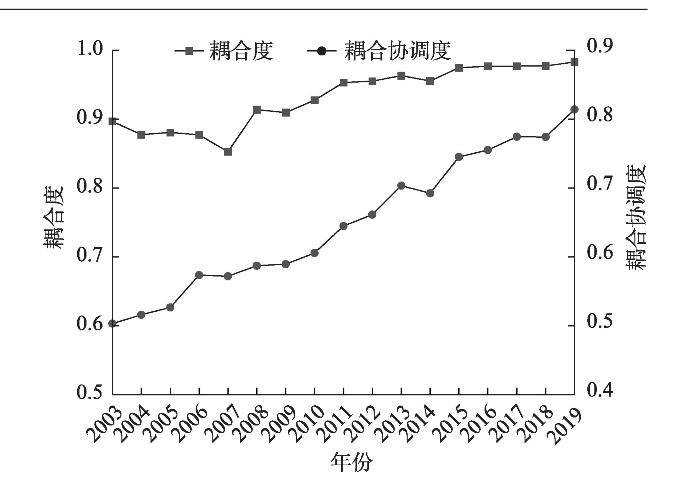


图2 2003—2019年新疆人居环境系统耦合度与耦合协调度

Fig. 2 Coupling degree and coupling coordination degree of human settlements system in Xinjiang from 2003 to 2019

协调性不断增强。

根据耦合协调度变化，将2003—2019年新疆人居环境分为4个发展阶段(图3)：(1) 勉强耦合协调阶段(2003—2009年)。此阶段社会系统与居住系统的发展水平极其滞后，社会系统中的经济发展水平较低是其主要原因之一。(2) 初级耦合协调阶段(2010—2012年)。此阶段耦合协调度呈稳定上升趋势，社会系统与居住系统的发展水平大幅度提高，人类系统的发展水平远高于其他4个子系统。(3) 中级耦合协调阶段(2013—2018年)。此阶段耦合协调度在2014年下降后又逐渐上升，主要是因为2014年的自然系统综合评价水平跌入最低值。(4) 良好耦合协调阶段(2019年)。此阶段耦合度与耦合协调度均增长到17 a间最高值，新疆人居环境系统耦合协调度跃迁到良好阶段。

3.1.2 地州市间发展差异 从新疆14地州市之间耦合协调度的差异来看(图4)，差异最大出现在2013年，克拉玛依市(最高)与吐鲁番市(最低)相差0.2205。综合来看，新疆14地州市人居环境系统的耦合协调度均呈现波动上升的趋势，部分地州市数据的标准差大于10%，波动程度较大如乌鲁木齐市、吐鲁番市与克拉玛依市等；部分地州市波动程度较小、波动趋势相似，如哈密市、和田地区与伊犁哈萨克自治州直属县市(伊犁州直)等。其中乌鲁木齐市人居环境耦合协调度17 a间的平均增长率最高，为5.21%，而相应指标最低的是吐鲁番市，仅为2.24%，可见新疆14地州市人居环境系统耦合协调度增速不均匀、地区差异明显。

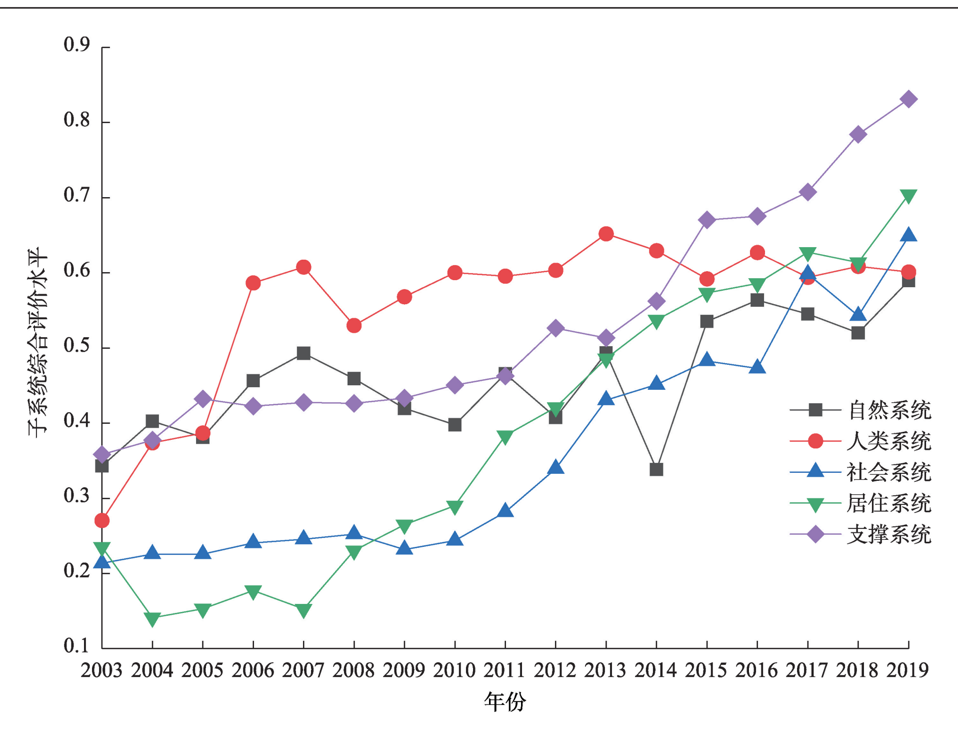


图3　2003—2019年新疆人居环境各子系统综合评价水平

Fig. 3　Comprehensive evaluation level of each subsystem of human settlements in Xinjiang from 2003 to 2019

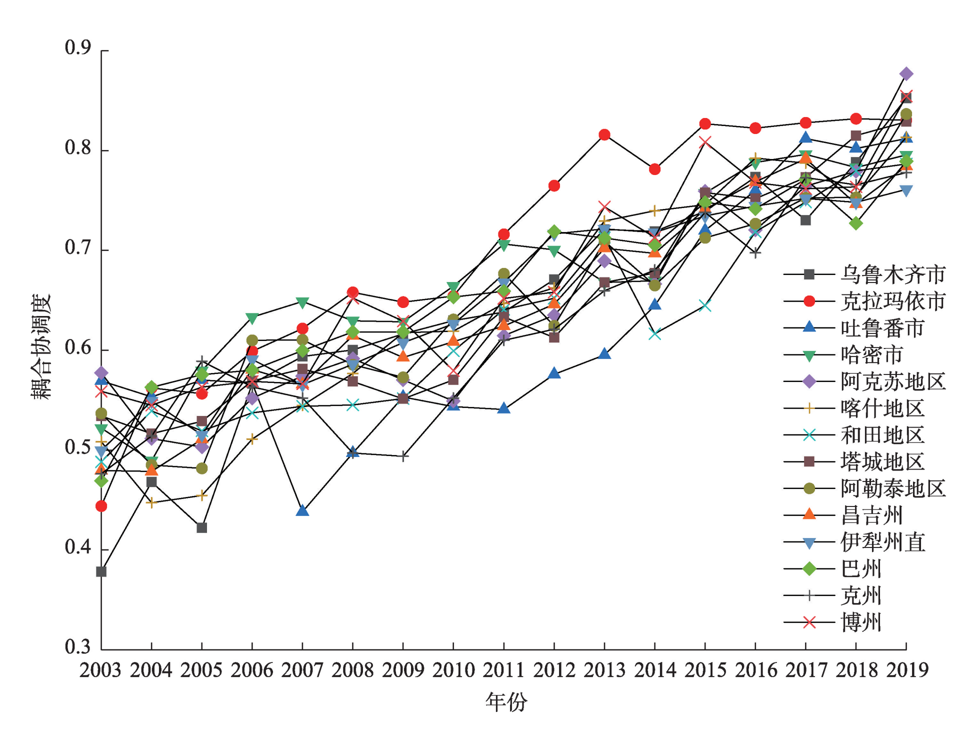


图4　2003—2019年新疆14地州市人居环境耦合协调度

Fig. 4　Coupling coordination degree of 14 administrative regions of prefecture level of human settlements in Xinjiang from 2003 to 2019

3.2　耦合协调度的空间分异特征

为进一步探索新疆人居环境系统耦合协调度的空间分异特征，选取2003、2008、2013、2019年4个时间截面绘制其空间分布图（图5）与趋势演化图（图6）。

3.2.1　空间分布差异规律　如图5所示，新疆14地州市人居环境系统的耦合协调度整体呈现逐渐升高的发展态势，具有显著的空间分布差异特征。部

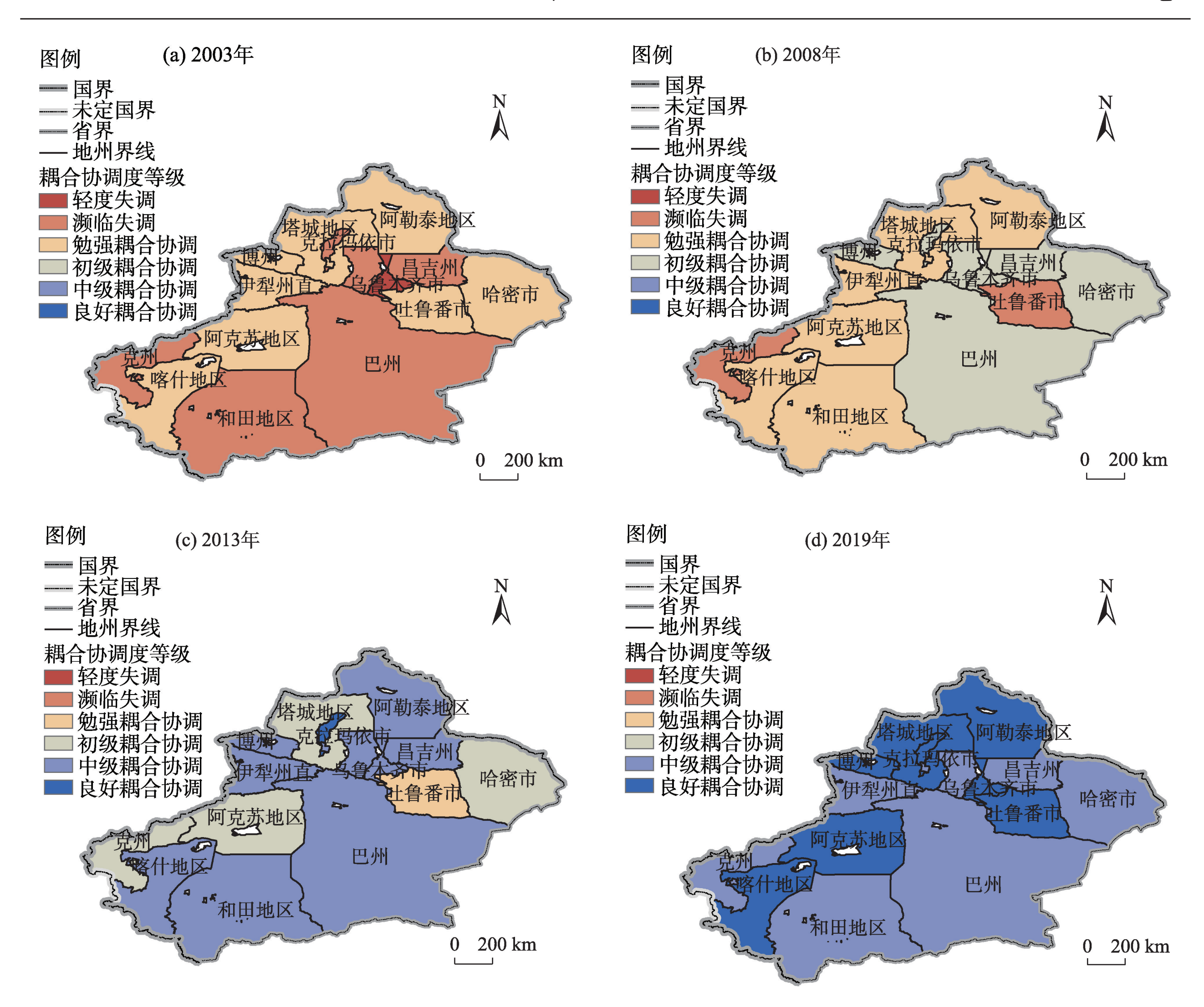


图5　新疆人居环境系统耦合协调度空间分布

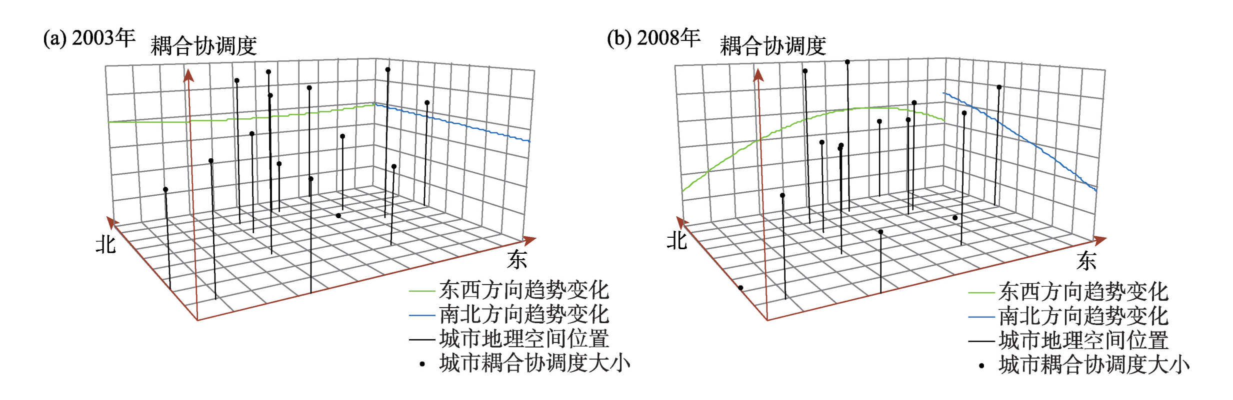
Fig. 5　Spatial distributions of coupling coordination degree of human settlements system in Xinjiang

分地州市出现涨落现象，如吐鲁番市，在2003年与2019年耦合协调度均处于对应时间截面中14地州市的最高值，但在2008年与2013年却处于最低值。部分地州市出现空间同步现象，如昌吉回族自治州（昌吉州）、和田地区与巴音郭楞蒙古自治州（巴州），这3个地区在2003、2013年与2019年的耦合协调度等级相同，说明新疆各地州市人居环境系统的内部作用力在空间尺度上具有一定程度的同步性。

由此可归纳其空间分布规律：从区域角度来看，西北侧与东南侧的人居环境系统耦合协调度差异较大，整体呈现出梯度差异显著的特点。以乌鲁木齐市与克拉玛依市为中心区域，在东西方向上呈现出"中间高、两侧低"的屋脊式分布格局，在南北方向上呈现出"北高南低"的空间分布格局。空间分布差异与各地州市人居环境系统发展不协调的制约因素有关：社会系统滞后是最大的制约因素，包括乌鲁木齐市、吐鲁番市、哈密市、阿克苏地区、阿勒泰地区、昌吉州、伊犁州直与博尔塔拉蒙古自治州（博州）；居住系统滞后成为制约因素的，包括喀什地区、和田地区、塔城地区、巴州与克孜勒苏柯尔克孜自治州（克州）；自然系统滞后成为制约因素的是克拉玛依市。

3.2.2　空间格局演化趋势　运用ArcGIS软件进行全局自相关分析，对新疆人居环境系统耦合协调度的Moran's I指数进行计算，其估计值均在0以下，Z得分与P值均未通过显著性检验（表3），说明新疆人居环境系统耦合协调度在整体上不存在空间分布的依赖性，在空间统计中呈现分散状态。

从拟合曲线的空间演变规律来看（图6），



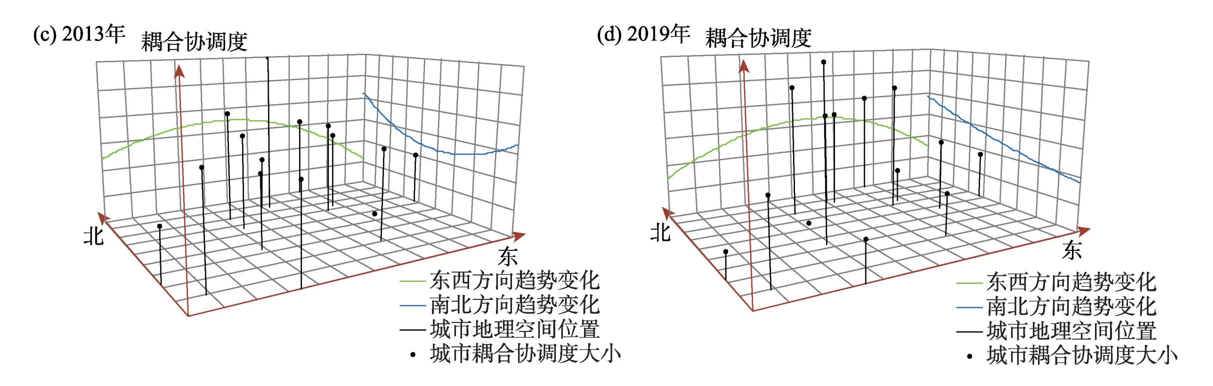


图6　新疆人居环境系统耦合协调度空间变化趋势

Fig. 6　Variation trend of coupling coordination degree of human settlements system in Xinjiang

表3　新疆人居环境系统耦合协调度的Moran's *I*估计值

Tab. 3　Moran's *I* estimate of the coupling coordination degree of human settlements system in Xinjiang

年份	Moran's *I*指数	*Z*得分	*P*值
2003	−0.213	−0.539	0.590
2008	−0.170	−0.359	0.720
2013	−0.328	−1.039	0.299
2019	−0.282	−0.779	0.436

注:*Z*得分为标准差的倍数;*P*值为概率。

2003—2019年新疆人居环境系统耦合协调度具有显著的趋势效应。在东西方向上,耦合协调度空间演变趋势从“一字型”逐渐向“倒U型”演化,中间与东西部的差异逐渐变大,说明新疆人居环境5个子系统之间相互作用强度的差异在东西方向逐渐扩大;在南北方向上,耦合协调度空间演变趋势从“一字型”逐渐向“U型”再到“斜线型”演化,变化趋势先加剧再变缓最后又加剧,说明新疆14地州市人居环境系统耦合协调度北部高于南部,南北部的整体互动强度逐渐增强超过中部,14地州市在南北方向的协调发展水平差异增大。

3.3　人居环境系统耦合作用机制

人居环境是一个开放的复杂巨系统,基于耦合协调度评价只能刻画出其时空演变的外在特征,无法揭示系统各个组成元素之间相互联系的内在机理。因此,本研究采用SEM模型进一步定量剖析新疆人居环境系统的耦合作用机制。

3.3.1　基于SEM的人居环境系统理论框架　本研究以吴良镛人居环境学[1]为理论基础,进而提出干旱区人居环境系统耦合机制的SEM理论框架。自然系统是人居环境的基础,人类的生产与生活都需要以自然生态作为依托和承载。人居环境系统的核心是“人类”,人居环境研究的主要目的是满足“人类居住”的需要。人类在人居环境中相互联系结成社会,渗透在经济、文化、教育与卫生各个社会领域,通过社会活动创造宜人的居住地,进一步形成更大规模、更为复杂的支撑网络。社会的运转与发展也会消耗自然资源,对生态环境造成损害。因此,提出以下的理论假设:H1:自然系统对人类系统有正向显著作用;H2:居住系统对人类系统有正向显著作用;H3:人类系统对社会系统有正向显著作用;H4:社会系统对居住系统有正向显著作用;H5:居住系统对支撑系统有正向显著作用;H6:社会系统对自然系统有负向显著作用。

3.3.2 模型结果分析 选取2003—2019年新疆14地州市人居环境系统耦合协调度的面板数据，每一个观测指标均有238个样本数据，可以保证模型估计结果的稳定性。将标准化处理的面板数据导入AMOS 26.0软件，采用最大似然估计法对其进行参数估计。模型拟合指数结果显示，卡方与自由度比值小于3，增值拟合指数、Tucker-Lewis指数与比较拟合指数均大于0.8，简效拟合优度指数大于0.5，模型的整体拟合效果达到标准。基于SEM模型的分析结果(表4)，假设H1、H2均未达到显著水平，因此假设不成立；假设H3、H4、H5、H6在0.001水平上显著，因此假设成立。

3.3.3 耦合机制分析 根据新疆人居环境5个子系统之间的作用路径与作用强度，可以看出新疆人居环境系统的协调发展是开放性、复杂性、多主体耦合机制的综合作用结果。

(1) 人类系统是人居环境系统协调发展的根本动力。人类系统直接作用于社会系统，人类系统每提升一个单位将会直接促进社会系统提升0.570个单位。因为人类是社会形成的直接来源与基础，社会的经济文化活动也是由人类进行的。此外，人类系统还通过社会系统，间接作用于居住系统、支撑系统，作用效应分别为0.554(0.570×0.972)、0.528(0.554×0.953)，说明人类需求、人口结构与规模会对人居环境其他系统的结构调整产生影响。

(2) 社会系统是人居环境系统协调发展的重要枢纽。社会系统对人居环境整体具有正向与负向两种作用力。在正向作用中，社会系统既可直接作用于居住系统，作用效应为0.972，也可间接作用于支撑系统，作用效应为0.926(0.972×0.953)，说明经济文化发展、教育医疗保障对于居住环境建设、公共设施建设具有正向促进作用。但社会系统也具有-1.189的负向影响作用于自然系统，说明目前新疆的社会发展模式一定程度上破坏了生态环境。

(3) 居住系统是人居环境系统协调发展的核心因素。人居环境建设的目标是创造和谐共生、适宜人类的居住环境，在干旱区中居住环境的生态宜居性凸显的尤为重要。居住系统对支撑系统具有单一显著的正向作用，居住系统每提升一个单位将会直接促进支撑系统提升0.953个单位。而支撑系统中的城市用水普及率与人均日生活用水量等指标的发展程度，是干旱区人居环境的生态宜居性评价的重要影响因素。

4 讨论

干旱区人居环境是一个复杂的动态演化系统，系统耦合协调度具有显著的时空异质性规律，系统耦合协调的实现关键在于发挥人类系统的动力作用与社会系统的枢纽价值，这与前人研究成果的结论一致[13-14,20]，表明本研究成果具备一定的科学参考价值。耦合协调度测度表明，当前新疆人居环境系统刚突破至良好耦合协调阶段，但社会、居住与自然系统的相对滞后限制着新疆人居环境的协调发展。这为干旱区人居环境建设提供启示：今后应重视自然基底的保护与修复，合理调整社会经济产业结构，大力发展干旱区的基础设施建设。此外，针对新疆人居环境系统耦合协调空间发展不平衡、不充分的问题，结合新疆的新型城镇化战略，应充分发挥乌鲁木齐市与克拉玛依市等协调发展水平较高地区的引领作用，促进区域协调发展。本研究的耦合机制结果表明，人居环境任何一个现实问题的形成都涉及人口、经济、生态等多方面的变迁，这与

表4 新疆人居环境系统作用路径与作用效应结果

Tab. 4 Results of action path and effect of human settlements system in Xinjiang

理论假设	作用路径	实际估计值	近似标准误差	临界比率	作用效应
H1	自然系统→人类系统	−0.212	0.285	−0.743	−0.263
H2	居住系统→人类系统	0.530	0.318	1.665	1.139
H3	人类系统→社会系统	1.315	0.390	3.373	0.570***
H4	社会系统→居住系统	0.905	0.061	14.938	0.972***
H5	居住系统→支撑系统	0.267	0.061	4.392	0.953***
H6	社会系统→自然系统	−0.639	0.079	−8.100	−1.189***

注：***表示在0.1%水平上显著。

前人理论保持一致[9]，即人居环境5个子系统之间的作用关系是渗透交错的、相互嵌套的。因此，新疆应加强“多规合一”的顶层设计，通过激发人类系统的发展动力、调控社会系统的作用力方向等途径，实现干旱区人居环境的可持续发展。

本研究仍存在以下不足之处：在研究内容上，随着研究尺度的变化，人居环境时空演变规律也会变化，主要表现在时间长短、空间大小与复杂性等方面。因此，本研究成果在不同时空尺度的适用性仍有待验证，未来考虑讨论多层级嵌套的时空耦合。在研究方法上，人居环境系统具有复杂的非线性关系，但SEM模型研究的是线性作用关系，过于复杂的路径无法计算，导致本研究未讨论人与自然的双向作用机制以及支撑系统的反向作用机制。因此，未来考虑采用非线性的研究方法去优化研究。

5　结　论

（1）总体来看，新疆人居环境系统耦合协调度形成“低—中—高”螺旋式上升的时间演变规律，具有梯度差异的空间分布格局、形成单一链式与网络化相结合的多主体耦合机制。

（2）从时间维度来看，新疆人居环境系统的耦合度与耦合协调度在2003—2019年均呈现出上升态势，耦合协调度从0.5031提高至0.8142，年平均增长率为3.05%，从勉强耦合协调类型演变为良好耦合协调类型。新疆14地州市人居环境系统耦合协调度整体呈现波动增长的态势，各地州市之间的耦合协调度增速不均匀。

（3）从空间维度来看，新疆人居环境系统耦合协调度在东西方向上呈现出“中间高、两侧低”的屋脊式分布格局，形成由“一字型”至“倒U型”的空间演变趋势；在南北方向上呈现出“北高南低”的空间分布格局，形成由“一字型”向“U型”再到“斜线型”的空间演变趋势。社会、居住与自然系统滞后是形成空间分异的重要制约因素。

（4）从耦合机制来看，主要形成“人类系统→社会系统→居住系统→支撑系统”，以及“社会系统→自然系统”的作用路径。人类系统是人居环境协调发展的根本动力，社会系统是人居环境系统耦合协调的重要枢纽，居住系统到支撑系统的演化则会影响干旱区人居环境的生态宜居性。因此，应该促进干旱区人居环境5个子系统的协同发展。

参考文献（References）

[1] 吴良镛. 人居环境科学导论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 37−99. [Wu Liangyong. Introduction to sciences of human settlements[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2001: 37−99.]

[2] 杜宏茹, 唐钰婷, 张紫芸. 新疆干旱区城镇化的地域特征及其高质量发展路径[J]. 经济地理, 2021, 41(10): 200−206. [Du Hongru, Tang Yuting, Zhang Ziyun. Regional characteristics and high-quality development path of urbanization in arid region of Xinjiang[J]. Economic Geography, 2021, 41(10): 200−206.]

[3] 庞瑞秋, 胡宁, 魏冶. 基于多源数据的新疆人居环境质量评价[J]. 地理科学, 2021, 41(12): 2127−2137. [Pang Ruiqiu, Hu Ning, Wei Ye. Evaluation of quality for human settlement in Xinjiang based on multi-source data[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(12): 2127−2137.]

[4] Guan Y Y, Li X M, Yang J, et al. Spatial differentiation of comprehensive suitability of urban human settlements based on GIS: A case study of Liaoning Province, China[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 24: 4150−4174.

[5] 李苏, 刘浩南. 干旱区城市化与生态韧性耦合协调的时空格局演化分析——以宁夏为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1281−1290. [Li Su, Liu Haonan. Spatio-temporal pattern evolution of coupling coordination between urbanization and ecological resilience in arid region: A case of Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1281−1290.]

[6] 唐健雄, 刘雨婧. 基于“三生”系统的典型旅游城市人居环境演变过程及机制研究——以张家界市为例[J]. 地理研究, 2021, 40(6): 1803−1822. [Tang Jianxiong, Liu Yujing. The evolutionary process and driving mechanism of human settlement environment in typical tourism cities based on living-production-ecological system: A case study of Zhangjiajie City[J]. Geographical Research, 2021, 40(6): 1803−1822.]

[7] 谢劲, 全明辉, 谢恩礼. 健康中国背景下健康导向型人居环境规划研究——以杭州市为例[J]. 城市规划, 2020, 44(9): 48−54. [Xie Jin, Quan Minghui, Xie Enli. Reserch on health-oriented human settlements planning in the context of healthy China: A case study of Hangzhou[J]. City Planning Review, 2020, 44(9): 48−54.]

[8] 李裕瑞, 曹丽哲, 王鹏艳, 等. 论农村人居环境整治与乡村振兴[J]. 自然资源学报, 2022, 37(1): 96−109. [Li Yurui, Cao Lizhe, Wang Pengyan, et al. Rural living environment improvement and rural revitalization[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(1): 96−109.]

[9] 吴良镛. 人居环境科学研究进展(2002—2010)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 11−24. [Wu Liangyong. The research prog-

ress of the sciences of human settlements (2002—2010)[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2011: 11-24.]

[10] 赵胡兰, 杨兆萍, 韩芳, 等. 新疆旅游产业-经济发展-生态环境耦合态势分析及预测[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1146-1154. [Zhao Hulan, Yang Zhaoping, Han Fang, et al. Analysis and forecast of coupling situation among tourism industry-economic development-ecological environment in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1146-1154.]

[11] 蔡文静, 夏咏, 赵向豪. 西北5省区"生态环境-经济发展-城镇化"耦合协调发展及预测分析[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(12): 219-227. [Cai Wenjing, Xia Yong, Zhao Xianghao. Analysis of coupled coordinated development and forecast of "ecological environment-economic development-urbanization" in five provinces of northwest China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(12): 219-227.]

[12] 刘滨谊. 人居环境研究方法论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 391-408. [Liu Binyi. Research methodology and application of human settlements[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2016: 391-408.]

[13] 李雪铭, 郭玉洁, 田深圳, 等. 辽宁省城市人居环境系统耦合协调度时空格局演变及驱动力研究[J]. 地理科学, 2019, 39(8): 1208-1218. [Li Xueming, Guo Yujie, Tian Shenzhen, et al. The spatio-temporal pattern evolution and driving force of the coupling coordination degree of urban human settlements system in Liaoning Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(8): 1208-1218.]

[14] 田深圳, 李雪铭, 杨俊, 等. 东北三省城市拟态与现实人居环境时空耦合协调特征与机制[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 781-798. [Tian Shenzhen, Li Xueming, Yang Jun, et al. Spatio-temporal coupling coordination and driving mechanism of urban pseudo and reality human settlements in the three provinces of northeast China [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 781-798.]

[15] 翁钢民, 唐亦博, 潘越, 等. 京津冀旅游-生态-城镇化耦合协调的时空演进与空间差异[J]. 经济地理, 2021, 41(12): 196-204. [Weng Gangmin, Tang Yibo, Pan Yue, et al. Spatiotemporal evolution and spatial difference of tourism-ecology-urbanization coupling coordination in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Economic Geography, 2021, 41(12): 196-204.]

[16] Tian S Z, Qi A, Li Z H, et al. Urban "Three states" human settlements high-quality coordinated development[J]. Buildings, 2022, 12(2): 178, doi: 10.3390/BUILDINGS12020178.

[17] 杨胜苏, 张利国, 喻玲, 等. 湖南省社会经济与水资源利用协调发展演化[J]. 经济地理, 2020, 40(11): 86-94. [Yang Shengsu, Zhang Liguo, Yu Ling, et al. The coordinated development and evolution of social economy and water resources utilization in Hunan Province[J]. Economic Geography, 2020, 40(11): 86-94.]

[18] 王勇, 孙瑞欣. 土地利用变化对区域水-能源-粮食系统耦合协调度的影响——以京津冀城市群为研究对象[J]. 自然资源学报, 2022, 37(3): 582-599. [Wang Yong, Sun Ruixin. Impact of land use change on coupling coordination degree of regional water-energy-food system: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(3): 582-599.]

[19] 戢晓峰, 谢世坤. 基于SEM的云南省URTT复合系统耦合协调机制研究[J]. 经济地理, 2019, 39(6): 46-57. [Ji Xiaofeng, Xie Shikun. Coupling mechanism of URTT composite system in Yunnan Province based on structural equation model[J]. Economic Geography, 2019, 39(6): 46-57.]

[20] 王建康, 韩倩. 中国城市经济-社会-环境耦合协调的时空格局[J]. 经济地理, 2021, 41(5): 193-203. [Wang Jiankang, Han Qian. Spatial-temporal pattern of the coupling coordination of urban economy-society-environment in China[J]. Economic Geography, 2021, 41(5): 193-203.]

Spatiotemporal evolution and mechanism of coupling coordination of human settlements system in arid area: A case of Xinjiang

YAO Lanbo[1,2], YE Jianming[1,3], WANG Yun[1], ZHU Xianwei[1]

(1. Agricultural College, Shihezi University, Shihezi 832002003, Xinjiang, China; 2. School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430062, Hubei, China; 3. School of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Human settlements in arid areas are restricted by the areas' natural drought condition, which shows an obvious characteristic of system imbalance. Therefore, promoting system coupling and coordination is important for the construction of human settlements in arid areas. To explore the spatiotemporal evolution mechanism of the human settlements in arid areas from the perspective of system coupling coordination, this study considers the human settlements of 14 administrative regions of prefecture level in Xinjiang, China as the research object. An evaluation system is created for the coordinated development of human settlements in arid areas. Based on the coupling coordination degree model of five subsystems, this study comprehensively uses the entropy method, GIS spatial analysis, and structural equation model to explore the spatiotemporal evolution law and coupling mechanism of the coupling coordination degree of the human settlements system in Xinjiang from 2003 to 2019. The results show the following: (1) Time dimension: from 2003 to 2019, the coupling degree and coupling coordination degree of the human settlements system in Xinjiang showed a fluctuating upward trend, and the growth rate was uneven among the 14 administrative regions of prefecture level. (2) Spatial dimension: forming the spatial distribution pattern of "high in the middle, low on both sides, high in the north and low in the south", evolving from "one-line type" to "inverted U type" in the east-west direction, and from "one-line type" to "U type" and then to "oblique line type" in the north-south direction. (3) Mechanism of action: mainly formed the path of "human system→social system→residential system→support system", and "social system→natural system", the effect is respectively 0.570, 0.972, 0.953, and −1.189. Among them, the human system is the fundamental driving force for the coordinated development of human settlements in arid areas, and affects other systems positively or negatively through the social system.

Key words: human settlements in arid area; system coupling; space analysis; structural equation model; Xinjiang